

Валентин УЧАНІН¹, Володимир РИБАЧУК¹, Валерій ДЕРЕЧА²

ВИХРОСТРУМОВА ОЦІНКА ВНУТРІШНІХ КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ДВОШАРОВИХ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ БЕЗ ДЕМОНТАЖУ

¹ *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів 79060, Україна. E-mail: vuchanin@gmail.com*

² *ДП АНТОНОВ
вул. Туполева, 1, Київ, 03062, Україна.*

Valentyn UCHANIN¹, Volodymyr RYBACHUK¹, Valeriy DERECHA²

EDDY CURRENT EVALUATION OF INTERNAL CORROSION DAMAGES IN TWO-LAYER AIRCRAFT STRUCTURES WITHOUT DISASSEMBLING

¹ *Karpenko Physico-mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com*

² *Antonov State Company
1, Tupoliev St., Kyiv, 03062, Ukraine.*

ABSTRACT

The well-timed detection of corrosive damages is very important for the accident-free operation of long-term exploited aircraft structures as part of aircraft maintenance. The most susceptible to corrosive damage are aluminum alloy units (for example, internal surfaces of double-layer structures, skins of a fuselage and wings, the areas of the bathrooms). From the eddy current (EC) inspection method, all types of corrosion damage can be characterized as total or local corrosion damages, depending on the ratio of the damaged area and the sensitive area of EC probe (ECP). The total corrosion can be interpreted as skin thinning and evaluated by absolute type ECP. For local corrosion detection, low-frequency differential type ECP can be applied. The most complicated situation occurs when corrosive damages are situated in internal surfaces of the double-layer aircraft structures (bottom surface of a first (top) layer or top surface of the second layer). Low-frequency EC probes of double differential type were developed to investigate the detectability of the local type corrosion defects (like corrosion pit or pitting) in aluminum alloy double-layer structures. Signals of developed EC probes were investigated in the complex plane by universal EDDYCON C type EC flaw detector. The local type corrosive damages were simulated by drilled holes characterized by different diameters and depths. The dependences of investigated EC probes detectability on the local defect diameter, residual thickness and thickness of upper skin were determined. The possibility to estimate the residual thickness of skin in the area of local (like pit or pitting) defects by EC signal phase evaluation was shown. Results obtained show the prospects of EC method to evaluate different types of hidden corrosive damages in aircraft double-layer structures without disassembling.

KEY WORDS: *aircraft, aluminum alloy, corrosion damage, pit, eddy current method, residual thickness*

ВСТУП

Методи неруйнівного контролю (НК) авіаційних конструкцій (АК) вкрай важливі для моніторингу їх технічного стану з метою прогнозування залишкового ресурсу, а також для переходу з експлуатації за визначеним ресурсом на експлуатацію за технічним станом [1, 2]. В літаках АН після тривалої експлуатації виявляють такі види корозійних пошкоджень (КП): пітингове, розшарувальне, міжзеренне, щільне, контактне та корозійне розтріскування [3]. В алюмінієвих сплавах (АС) часто зустрічаються пітингові (окремі точкові ураження, діаметр яких менший за їх глибину) і розшарувальні (спучення і розшарування металу) КП. На зовнішніх частинах АК такі КП можна виявити візуально. Для оцінювання технічного стану обшивок визначають їх товщину, наприклад ультразвуковим методом НК [1]. Складнішим є контроль багатшарових нероз'ємних АК. Тут методи вихрострумовео контролю (ВК)

найперспективніші через можливість виявлення внутрішніх КП без демонтажу вузлів [1, 4]. Такі задачі вимагають подальшого вдосконалення методів ВК на основі створення нових вихрострумових перетворювачів (ВСП) і методів інтерпретації результатів контролю.

З позиції ВК усі види КП можна умовно поділити на загальну і локальну корозію залежно від співвідношення розміру зони ураження та розміру активної зони (зони чутливості) ВСП, який визначає локальність контролю і роздільну здатність методу [1]. Загальні КП можна трактувати, як стоншення обшивки, тому під час експериментальних досліджень їх моделюють пластинами різної товщини із відповідного АС. Локальну корозію моделюють у вигляді плоскодонних свердлень. Перші виявляють за допомогою ВСП абсолютного типу, які чутливі до зміни товщини виробу, і засобів вихрострумової товщинометрії [1, 5]. Другі – за допомогою диференційних ВСП або ВСП подвійного диференціювання, які до змін товщини нечутливі, а реагують тільки на локальні неоднорідності матеріалу [1, 6]. Пропонувався також перспективний підхід із застосування гібридних ВСП, які поєднують властивості абсолютних і диференційних ВСП. Це дозволяло отримувати інформацію про загальні і локальні КП мідних судових труб заборотної води [7]. Але дослідження по використанню таких ВСП для контролю АК не проводились.

Задача виявлення КП ускладнюється у випадках їх утворення на внутрішній стороні обшивки, між шарами багат шарових вузлів, під головкою заклепки або під шаром діелектричного лакофарбового покритву. Характерними прикладами найскладніших для корозійного контролю АК є (рис. 1): двошарові вузли з загальним КП на нижній поверхні верхньої обшивки (рис. 1 *a*), з загальним КП на верхній поверхні нижньої обшивки (рис. 1 *b*), з локальним КП (корозійні виразки або пітинг) на нижній поверхні верхньої обшивки (рис. 1 *c*) або верхній поверхні нижньої обшивки, а також розшаровуюча корозія під головкою заклепки (рис. 1 *d*). Тут навіть для відносно простої двошарової АК (рис. 1) умови виявлення КП погіршуються через послаблення корисного сигналу ВСП (вплив скін-ефекту). Сигнал ВСП спотворюється також зміною зазору між ВСП і поверхнею об'єкта контролю та зміною діелектричного проміжку між шарами металу. Зусилля дослідників спрямовано на зменшення впливу цих чинників на оцінку ступеня КП. Загальний аналіз впливу товщини і проміжку між шарами на годограф сигналу абсолютного ВСП у комплексній площині проведено в роботі [8].

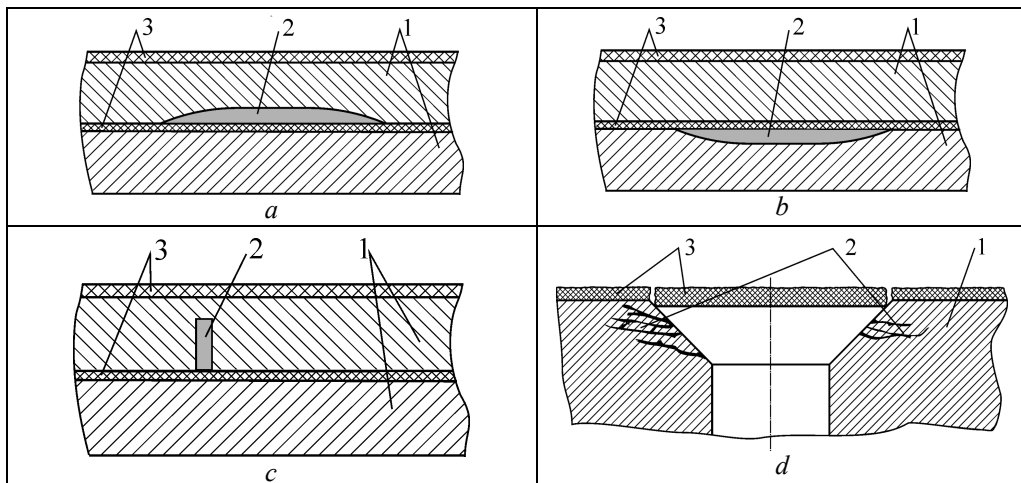


Рис. 1. Характерні приклади найскладніших для вихрострумового контролю вузлів з КП:

1 – обшивки з АС, 2 – КП; 3 – діелектричні покритви або герметики.

Fig. 1. Characteristic examples of the difficult for inspection corroded units:

1 – aluminum alloy skins; 2 – corrosive damages; 3 – dielectric coatings or sealants.

Аналіз достовірності різних технологій виявлення КП проведено в роботі [9]. Автори розглядають одночастотний, двочастотний і імпульсний варіанти ВК. Зазначається, що достовірність визначення товщини верхньої обшивки одночастотним методом є невисокою, так як стоншення обшивки на 10 % можна виявляти з вірогідністю менше ніж 90 %. За двочастотного контролю робочі частоти вибирають такими, щоб отримати достатню чутливість до товщини першого і другого шарів і мінімізувати вплив зазору та інших чинників. Але достовірність двочастотного контролю не набагато вища за одночастотного. Автори показують

перспективи імпульсного методу, але зазначають, що запропонований підхід вимагає використання сканерів, що сповільнює процедуру контролю. Імпульсне збудження і роботизований сканер використано у вихрострумівій системі типу TRECSCAN, в якій використано ВСП на базі давача Хола [10, 11]. Для виділення корисного сигналу на фоні впливу перешкоджаючих чинників використано аналіз вихідного сигналу ВСП у часі. Інший підхід використано в роботі, де контроль проводять за допомогою звичайних ВСП абсолютного типу, а селективність контролю забезпечують шляхом аналізу сигналу у комплексній площині [12]. Методика виявлення дефектів (в тому числі КП) в зоні заклепок (рис. 1 *d*) з використанням кільцевих ВСП абсолютного типу запропонована в роботах [13, 14]. В усіх зазначених роботах представлено методи визначення рівня загальної корозії за сигналами ВСП абсолютного типу.

Вихрострумівій метод виявлення локальних КП з використанням низькочастотних ВСП запропоновано в нашій роботі [13]. Використовували ВСП діаметром 12,5 mm на робочій частоті 3 і 10 kHz. Методика апробована на нерозбірних вузлах «стрингер-обшивка» літаків КБ ім. Туполева після довготривалої експлуатації. На внутрішній поверхні стрингера товщиною 3,0 mm вдалося виявити корозійну виразку глибиною 0,16 mm, що складає 5,2 % від товщини. Запропоновано невитратну методику контролю підпідлогової частини фюзеляжу, за якою на основі статистичних даних про розподіл КП зону контролю розбивають на чотири ділянки, що характеризуються різною ймовірністю появи КП. Спочатку контролюють ділянку, яка найчастіше піддається корозії. За відсутності корозії подальший контроль не проводять. Якщо КП виявляють, то контролюють наступну ділянку і т.п.

Підсумовуючи зазначимо, що перспективним і невирішеним на сьогодні завданням є задача виявлення локальних КП в авіаційних конструкціях із АС з оцінюванням залишкової товщини (ЗТ).

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У результаті попередніх досліджень для виявлення прихованих локальних КП вибрано низькочастотні ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 0601 [6]. Кожний з цих ВСП складається з двох обмоток збудження і двох вимірювальних обмоток, які включені по схемі подвійного диференціювання. Параметри досліджуваних ВСП подано в таблиці 1, де $D_{ВСП}$ – діаметр ВСП, D_{ϕ} – діаметр феритових осердь, w_{O3} і w_{BO} – кількість витків обмоток збудження і вимірювальних обмоток, L_{O3} і L_{BO} – індуктивності обмоток збудження і вимірювальних обмоток.

Таблиця 1. Параметри досліджуваних ВСП.
Table 1. Parameters of investigated eddy current probes.

Тип ВСП	$D_{ВСП}$, mm	D_{ϕ} , mm	w_{O3}	w_{BO}	L_{O3} , μ H	L_{BO} , kH
МДФ 0601	6,0	1,0	185	360	320	1,2
МДФ 0801	8,0	1,85	215	416	940	3,7

Локальні КП моделювали плоскодонними свердленнями діаметром 2, 3 і 5 mm на глибину від 0,5 до 3 mm (приблизно через 0,5 mm) в пластині із АС Д16 товщиною 3,7 mm. Сигнали ВСП реєстрували у комплексній площині дисплея вихрострумівіого дефектоскопу типу ЕДДІКОН С. При цьому сигнали від дефектів з різною глибиною залягання реєстрували під час сканування пластини з дефектами з непошкодженої (звотної відносно нанесених дефектів) сторони. Таким чином досліджували сигнали від локальних КП різного діаметру і глибини залягання (і, відповідно, різною залишковою товщиною (ЗТ) h_r пластини в місці розташування КП), що відповідало випадку, поданому на рис. 1 *c*. Далі досліджували випадок, коли локальні КП різного діаметру і глибини виявляли через непошкоджені пластини різної товщини. Тобто імітували випадок, коли локальне КП розповсюджується на верхній поверхні нижньої обшивки, а контролювати необхідно через верхню непошкоджену пластину. Виявлюваність різних дефектів визначали експертним оцінюванням надійності виявлення локального дефекту дослідником, яке визначали можливістю виділити сигнал від дефекту на фоні завад.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для практики ВК важливо визначити граничні можливості ВСП, для чого необхідно дослідити виявлюваність локальних КП залежно від їх розташування. Результати досліджень виявлюваності локальних КП під час контролю зі зворотної сторони обшивки залежно від їх діаметру D і ЗТ h_r подано в таблиці 2. Тут знаками (+), (-) і (\pm) позначено, відповідно, випадок надійного виявлення відповідного дефекту, його пропуск і суперечливий випадок, коли сигнал від дефекту ледве виділяється на рівні завад.

Таблиця 2. Виявлюваність локальних КП для ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 0601.
Table 2. Detectability of the local corrosion damages for MDF 0801 and MDF 0601 eddy current probes.

Тип ВСП	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601
$h_r, \text{ mm}$ $D, \text{ mm}$	0,5	0,5	1	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,5	2,5	3	3
2	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-
3	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	+	+	+	+	+	+	\pm	+	-	\pm	-

Подані в табл. 2 результати показують можливість надійно виявляти усі локальні КП під час контролю зі зворотної сторони обшивки із АС на глибині 2,5 mm і 2,2 mm за використання ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 0601 відповідно. Це складає 67 % і 59 % від товщини контрольованої обшивки відповідно, що підтверджує перспективи практичного застосування таких ВСП для виявлення прихованих КП на нижній поверхні верхньої обшивки.

Результати дослідження виявлюваності локальних КП у другому шарі двошарового зразка під час контролю через шар верхньої обшивки показав, що обидва ВСП дозволяють виявляти усі КП за товщини верхньої пластини до 1,6 mm включно. За більшої товщини верхньої обшивки виявлюваність суттєво залежить також від діаметру D і глибини t КП. Результати досліджень виявлюваності дефектів у другому шарі двошарового зразка залежно від діаметру D і глибини дефекту t через верхню обшивку товщиною 2,2 і 2,8 mm подано в таблицях 3 і 4 відповідно.

Таблиця 3. Виявлюваність локальних КП у другому шарі обшивки під час контролю через верхню обшивку товщиною 2,2 mm для ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 0601.

Table 3. Detectability of the local corrosion damages situated in the second layer during the inspection through upper 2.2 mm thick skin for MDF 0801 and MDF 0601 type eddy current probes.

Тип ВСП	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601
$t, \text{ mm}$ $D, \text{ mm}$	3	3	2,5	2,5	2	2	1,5	1,5	1	1	0,5	0,5
2	+	\pm	+	\pm	+	\pm	+	\pm	+	-	+	-
3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	\pm	+	-
5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	\pm	+	-

Таблиця 4. Виявлюваність локальних КП у другому шарі обшивки під час контролю через верхню обшивку товщиною 2,8 mm для ВСП типу МДФ 0801 і МДФ 0601.

Table 4. Detectability of the local corrosion damages situated in the second layer during the inspection through upper 2,8 mm thick skin for MDF 0801 and MDF 0601 type eddy current probes.

Тип ВСП	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601	МДФ 0801	МДФ 0601
$t, \text{ mm}$ $D, \text{ mm}$	3	3	2,5	2,5	2	2	1,5	1,5	1	1	0,5	0,5
2	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-
3	+	\pm	+	-	+	-	+	-	+	-	\pm	-
5	+	+	+	\pm	+	\pm	+	\pm	+	-	\pm	-

Подані в табл. 3 і 4 результати показують, що для виявлення локальних КП у другому шарі перспективнішим є ВСП типу МДФ 0801, який дозволяє надійно виявляти через обшивку товщиною 2,2 mm усі досліджувані дефекти. І навіть через обшивку товщиною 2,8 можна надійно виявляти усі дефекти глибиною більше 1,0 mm. ВСП типу МДФ 0601 може застосовуватись тільки за товщини верхньої обшивки до 1,6 mm. Подані в табл. 3 і 4 результати показують перспективи застосування досліджуваних ВСП для виявлення локальних КП у другому шарі двошарових АК.

Для практики важливо не тільки своєчасно виявити КП в силових елементах АК. Не менш важливо провести оцінку ЗТ обшивки у місці розташування локального дефекту. Це дасть можливість за відомих даних про швидкість розповсюдження корозії прогнозувати термін безаварійної роботи АК з КП. Розглянемо можливість визначення ЗТ у місці розташування локального дефекту за параметрами відповідних сигналів ВСП у комплексній площині. На рис. 2 подано годографи сигналів ВСП від локальних дефектів діаметром 2,0 mm під час контролю зі зворотної сторони обшивки із АС від наскрізного дефекту ($h_r = 0$) (a) і дефектів з ЗТ 0,5 mm (b); 1,0 mm (c); 1,7 mm (d); 2,1 mm (e) і 2,5 mm (f). Чутливість дефектоскопу на рис. 2 b, рис. 2 c, рис. 2 d, рис. 2 e і рис. 2 f збільшена порівняно з сигналом від поверхневого дефекту (рис. 2 a) на 3, 6, 16, 18, 20 і 26 dB відповідно. Результати отримано на робочій частоті 2,5 kHz. Відповідні зміни амплітуди і фази сигналів ВСП від ЗТ у місці розташування локальної КП подано на рис. 3.

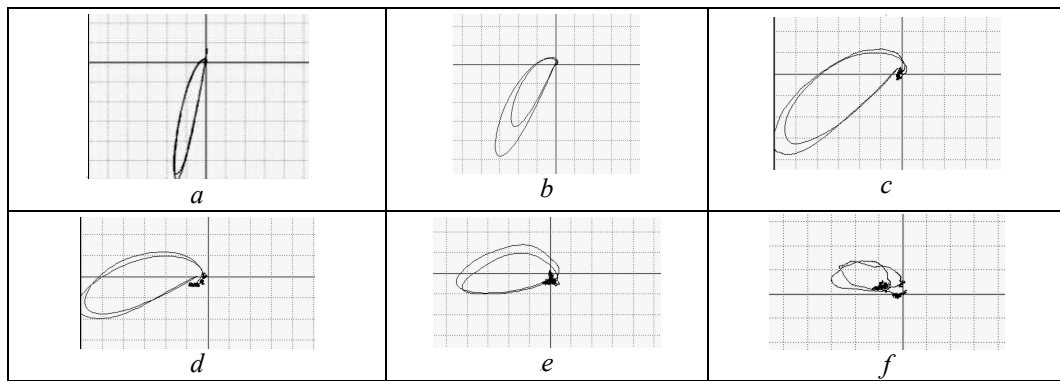


Рис. 2. Годографи сигналів від наскрізного (a) і підповерхневих локальних КП з ЗТ 0,5 mm (b); 1,0 mm (c); 1,7 mm (d); 2,1 mm (Ee) і 2,5 mm (f) для штучного локального дефекту діаметром 2,0 mm.
Fig. 2. Signal hodographs from 2 mm diameter local corrosion damages from surface defect (a) and from subsurface defects with residual thicknesses 0,5 mm (b); 1,0 mm (c); 1,7 mm (d); 2,1 mm (Ee) і 2,5 mm (f).

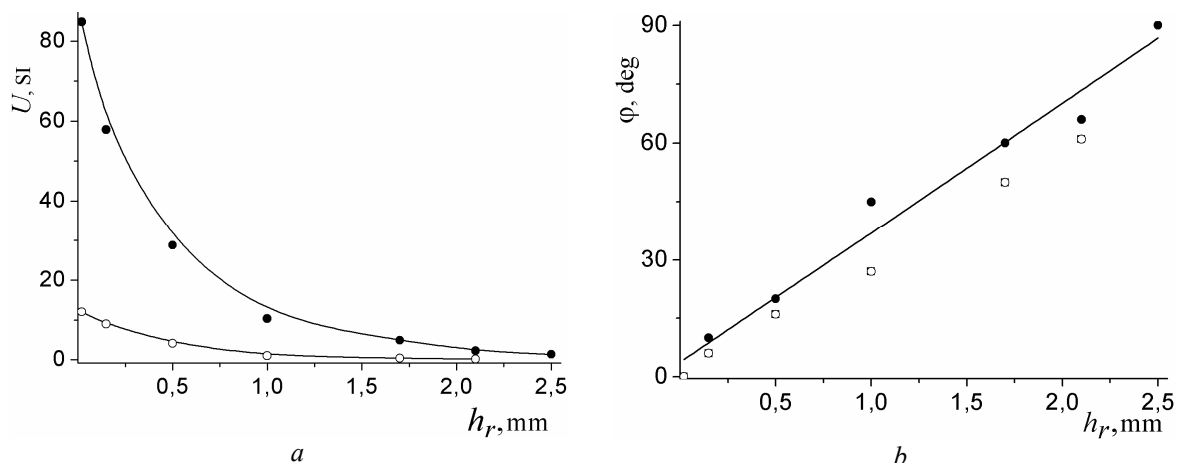


Рис. 3. Зміни амплітуди (a) і фази (b) сигналів від локальних КП залежно від ЗТ.
Fig. 3. Changes of signal amplitude (a) and phase (b) from local corrosion on the residual thicknesses.

Подані на рис. 2 і рис. 3 результати свідчать, що амплітуда і фаза сигналу обох досліджених ВСП суттєво залежить від ЗТ у зоні КП. Найсуттєвіше (на 2 порядки) змінюється амплітуда сигналу. В той же час відомо, що амплітуда залежить також від діаметру D КП, що

не дозволяє використати її для оцінювання ЗТ [7]. Для оцінювання ЗТ h_r ефективніше використовувати фазову залежність сигналу (рис. 3 б), яка для обох ВСП має однаковий лінійний характер. Це дозволяє стверджувати, що характер цієї залежності більше визначається робочою частотою, ніж від типом ВСП.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз проблеми виявлення і оцінки КП в АК із АС. Поставлено задачу виявлення і оцінки внутрішніх локальних КП двохшарових АК, зокрема на нижній поверхні верхньої обшивки і на верхній поверхні нижньої обшивки.

2. Для виявлення і оцінки КП запропоновано низькочастотні ВСП подвійного диференціювання, які забезпечують високу виявлюваність локальних КП на зворотній поверхні верхньої обшивки та у другому шарі двохшарової АК.

3. Фаза сигналу ВСП від внутрішніх локальних КП корелює з її глибиною і може бути використана для оцінювання ЗТ обшивки в зоні локального КП. Це необхідно для прогнозування працездатності тривало експлуатованих АК з локальними КП.

4. Вихрострумний метод має перспективи для впровадження в практику експлуатаційного контролю АК з метою оцінки ЗТ в зоні локальних КП.

ЛІТЕРАТУРА

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідниковий посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков та інші. – Львів: СПОЛЮМ, 2007. – 1068 с.
2. Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft / O. Ostash, V. Uchanin, O. Semenets et al // Research in Nondestructive Evaluation. – Vol. 29. – № 3. – P. 156–166.
3. Аболихина Е. В., Моляр А. Г. Коррозия самолетных конструкций из алюминиевых сплавов // Физ.-хим. механика материалов. – 2003. – Vol. – № 6. – С. 106–110.
4. Corrosion Control for Aircraft. Advisory circular AC № 43-4B. – Date: 9.11.18. – U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
5. Eddy-current measurements of corrosion-related thinning in aluminium lap splices / S. Mitra, P.S. Urali, E. Uzal, J.H. Rose, J.C. Moulder // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Vol. 12. Ed. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1993. – P. 2003–2010.
6. Учанін В. М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання. Львів: СПОЛЮМ, 2013. – 268 с.
7. Determination of the degree of corrosion damage of articles made of nonmagnetic metals by an electromagnetic method / A.Ya. Teterko, V.N. Uchanin, G.N. Makarov, V.P. Zagatskii // Material Science. – 1978. – Vol. – № 3. – P. 312–315.
8. Учанін В., Мок Г. Вихрострумний контроль корозійних пошкоджень двохшарових авіаційних конструкцій // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. № Вип. 9: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка. – 2004. – С. 113–122.
9. Probability of Detection of Corrosion in Aircraft Structures / J.P. Komorowski, D.S. Forsyth, D.L. Simpson., R.W. Gould // ATW Workshop Proc. “Airframe Inspection Reliability under Field/Depot conditions”, 13-14 May 1998, Brussel (Belgium). – P. 81–88.
10. Smith R. A. Fine-tuning the eddy current detection of hidden first-layer corrosion in aircraft skins // Insight. – 1998. – Vol. 40, Iss. 10. – P. 712–721.
11. Smith, R A. Hugo, G R. Transient eddy-current NDE for aging aircraft - Capabilities and limitations // Insight. – 2001. – Vol 43. – № 1. – P. 14–20.
12. Sychalska J.M., Dragan K., Dziendzikowski M. Numerically Enhanced Eddy Current Inspection of Corrosion Losses of Aircraft Structures // 19th World Conf. on Non-Destructive Testing, Munich, 2016.
13. Учанін В.Н. Вихретоковые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций // Технич. диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 2. – С. 3–12.
14. Uchanin V., Nardoni G., Turconi M. Rapid eddy current technique for detection of the cracks propagated around the rivet holes in the second layer // Conf. Nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica. 23-25 October 2019. Milan.
15. Uchanin V., Tsirg V. Detection of hidden corrosion damage in aviation structures by the eddy current method // Material science. – 1991. – Vol. 26. – № 4. – P. 475–477.